

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ФОРМЫ ЯДЕР НА ISOL-УСТАНОВКАХ (ИРИС, ISOLDE, ИРИНА) МЕТОДОМ РЕЗОНАНСНОЙ ФОТОИОНИЗАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ

П. Л. Молканов, А. Е. Барзах, С. Ю. Орлов,
В. Н. Пантелеев, М. Д. Селиверстов, В. С. Толичев,
Д. В. Федоров*

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

Представлен обзор последних результатов по исследованиям формы ядер в области нуклидной карты вблизи свинца, выполненные на установках ISOLDE (ЦЕРН) и ИРИС (ПНПФ) с помощью резонансной фотоионизационной спектроскопии в лазерном ионном источнике (спектроскопии «в источнике»). Этот метод представляет собой мощный инструмент в исследованиях формы, размеров и электромагнитных моментов ядер, которые извлекаются из измеренных изотопических сдвигов и сверхтонкой структуры оптических линий соответствующих атомов. Также обсуждается установка ИРИНА, создаваемая на пучке реактора ПИК в ПНПФ. Метод спектроскопии «в источнике» будет использоваться на установке ИРИНА для эффективного изучения ядер, близких к границе нейтронной стабильности.

We present an overview of the recent results on nuclear shape investigations in the lead region performed at the ISOLDE (CERN) and IRIS (PNPI) facilities using the in-source resonance-ionization spectroscopy (in-source spectroscopy). This technique is a powerful tool in the study of nuclear shape, size and electromagnetic moments that are extracted from hyperfine structure and isotope shift in the atomic spectra of radioactive nuclei. The IRINA facility created at the high flux neutron reactor PIK at PNPI is also discussed. The in-source spectroscopy will be applied at the IRINA facility for efficient studies of nuclei close to the neutron drip line.

PACS: 21.10.Ft; 27.50.+e; 27.60.+j; 27.70.+q; 31.30.Gs

ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов исследования размеров и формы ядра является измерение изотопических сдвигов и сверхтонкой структуры оптических линий соответствующих атомов методами лазерной оптической спек-

* E-mail: molkanov_pl@pnpi.nrcki.ru

троскопии. Полученная из оптических спектров модельно-независимая информация позволяет установить, как меняется структура, размеры и форма ядер, входящих в длинные цепочки изотопов одного элемента. В частности, изотопические сдвиги (ИС) оптических линий позволяют получить информацию о среднеквадратичном зарядовом радиусе (СКЗР) ядра и о его среднеквадратичной деформации. Из сверхтонкой структуры (СТС) определяются магнитные дипольные и электрические квадрупольные моменты ядер, а также в ряде случаев — спин ядра. Квадрупольные моменты связаны со статической деформацией ядра, магнитные моменты позволяют делать выводы об одночастичных конфигурациях, эволюция которых также в значительной степени зависит от особенностей формы ядра. Наконец, в ряде случаев анализ СТС позволяет определить величину аномалии сверхтонкой структуры, отражающую распределение намагниченности по объему ядра.

В результате проведения систематических экспериментальных исследований было установлено, что в большинстве случаев ход изотопической зависимости зарядовых радиусов от числа нейтронов N носит плавный характер [1, 2]. Однако особый интерес для современной ядерной физики представляет исследование тех ядер, у которых имеет место отклонение в поведении зарядовых радиусов от общей систематики, например, резкие скачки при $N = 60$ и 90 [2, 3], изломы при переходе N через магическое число [2, 4] (оболочечный эффект), большой четно-нечетный эффект в зарядовых радиусах ртути [5] и т. д.

Дальнейший прогресс в определении форм экзотических ядер был связан с разработкой высокочувствительных лазерных методов и проведением on-line экспериментов на ISOL-установках, что позволило существенно расширить области исследуемых ядер.

1. НЕЙТРОНОДЕФИЦИТНЫЕ ЯДРА В ОБЛАСТИ СВИНЦА

Множество эффектов, связанных с изменением формы ядер, было обнаружено в нейтронодефицитной области нуклидной карты вблизи свинца ($Z = 82$). Наиболее яркое проявление нерегулярности изменения форм было обнаружено более 50 лет тому назад для нейтронодефицитных изотопов ртути [5] ($Z = 80$) около середины нейтронной оболочки ($N = 104$). Нечетно-нейтронные изотопы ртути ($N = 101, 103, 105$) оказались сильно деформированными (параметр квадрупольной деформации $\beta \approx 0,3$), в то время как их четно-нейтронные соседи ($N = 102, 104, 106$) сохраняют форму, близкую к сферической. Соответственно, зарядовые радиусы демонстрируют характерную «пилообразную» картину: $^{181, 183, 185}\text{Hg}$ имеют значительно больший радиус, чем $^{180, 182, 184}\text{Hg}$. Для основного и изомерного состояний ядра ^{185}Hg также наблюдается изомерия формы (сосуществование форм). Обнаружение эффектов «чередования форм» (shape staggering) и сосуществования форм (shape coexistence) в ядрах ртути было признано «одним из наиболее ярких

открытий в физике структуры атомных ядер за последние полвека» [6]. И хотя качественное объяснение данных эффектов было дано вскоре после экспериментального обнаружения, их детальное описание продолжает оставаться вызовом для теоретической ядерной физики. Сходный скачок деформации был позднее обнаружен и для изотопов золота ($Z = 79$) при $N = 107$, при этом «чередования форм» здесь не наблюдается, и все измеренные изотопы золота с $104 \leq N \leq 107$ ($^{183-186}\text{Au}$) оказались сильно деформированными [7].

При исследовании ИС и СТС для изотопов свинца было продемонстрировано, что, несмотря на наличие низколежащих сильно деформированных возбужденных состояний у изотопов свинца вблизи середины нейтронной оболочки, основные состояния остаются сферическими как при $N = 104$, так и при меньшем числе нейтронов [8]. Было показано, что ход радиусов (деформации) основных состояний изотопов таллия ($Z = 81$) точно следует ходу радиусов основных состояний свинца, т. е. их форма остается близкой к сферической [9]. Совершенно иная картина наблюдается для изотопов полония ($Z = 84$) и астата ($Z = 85$): деформация в этих изотопических цепочках начинает заметно расти, соответственно, при $N = 113$ и $N = 107$, приближаясь к значениям, характерным для сильно деформированных ядер [10, 11]. При этом поведение деформации для нечетных и четных нейтронных изотопов не отличается друг от друга.

При исследовании изотопов висмута на установке ИРИС было обнаружено [12] заметное отклонение от сферического тренда, наблюдаемого для свинца, при приближении к $N = 106$. Чтобы иметь законченную картину эволюции формы в этой области нуклидной карты, важно продолжить исследование поведения деформации для более легких изотопов висмута (при $N < 106$).

Не менее важной задачей являлось продолжение измерений ИС и СТС для цепочки изотопов золота в сторону еще более нейтронодефицитных ядер для выяснения — происходит ли «возврат к сферичности» у изотопов золота, предсказанный некоторыми моделями [13] при $N < 100$.

2. ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДЕР НА ISOL-УСТАНОВКАХ

В настоящее время многие экспериментальные исследования ядер, удаленных от полосы бета-стабильности, проводятся на установках ISOL (Isotope Separator On-Line), основной частью которых являются масс-сепараторы, установленные на ускорителях различных заряженных частиц (протонов, тяжелых и легких ионов). За счет использования на ISOL-установках массивных горячих мишеней реализуется возможность получения пучков экзотических ядер высокой интенсивности, что, в свою очередь, позволяет проводить их дальнейшее исследование высокочувствительными оптическими методами. Сопрежение масс-сепаратора

ISOLDE с лазерной установкой для исследования ИС и СТС оптических линий изотопов ртути [5] явилось отправной точкой для последующего быстрого развития этой области экспериментальной физики.

Принцип работы установки ISOL состоит в следующем: при бомбардировке мишени пучком частиц, ускоренным до энергий от сотен мегаэлектронвольт до нескольких гигаэлектронвольт, в веществе мишени образуются продукты ядерных реакций в широком диапазоне Z и A . Из мишени, нагретой до высокой температуры, атомы исследуемых нуклидов диффундируют в ионный источник (поверхностной ионизации, плазменный или лазерный). Полученные ионы вытягиваются электрическим полем и поступают на вход масс-сепаратора, где разделяются его магнитным полем по массам. Лидирующими в мире ISOL-установками являются ISOLDE (ЦЕРН) и ISAC (TRIUMF, Канада). В России на базе синхроциклотрона СЦ-1000 в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в течение уже почти 50 лет действует ISOL-установка ИРИС (исследование радиоактивных изотопов на синхроциклотроне). Значительная часть важных экспериментальных результатов, полученных на установке ИРИС при исследовании короткоживущих ядер, связана с использованием методов лазерной оптической спектроскопии.

3. ЛАЗЕРНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Лазерная оптическая спектроскопия основана на исследовании положения спектральных линий в оптических спектрах атомов или ионов. Различие во взаимодействии ядер, имеющих различные размеры и массу, с электронной оболочкой атомов приводит к смещению (изотопическому сдвигу) уровней энергии и спектральных линий различных изотопов одного химического элемента. Сверхтонкое расщепление линий возникает в результате взаимодействия электромагнитных моментов ядра с электромагнитным полем, создаваемым электронами атома.

Методы лазерной оптической спектроскопии позволяют определять спины I , магнитные дипольные μ и электрические квадрупольные Q_S моменты ядер как в основных, так и в возбужденных (достаточно долгоживущих) ядерных состояниях, а также изотопические изменения средних квадратов зарядовых радиусов $\delta\langle r^2 \rangle_{A,A'} = \langle r^2 \rangle_{A'} - \langle r^2 \rangle_A$ для изотопов с массовыми числами A и A' . Эти характеристики ядер извлекаются из анализа измеренных ИС и СТС оптических линий соответствующих атомов.

Благодаря высокой интенсивности лазерного излучения и большому сечению взаимодействия лазерных фотонов с электронной оболочкой (до 10^{-10} см² в резонансе) лазерная оптическая спектроскопия позволяет проводить эксперименты с чрезвычайно малыми количествами вещества и, таким образом, исследовать короткоживущие ядра с аномальным нуклонным составом, получаемые в реакциях с очень низкими выходами.

В настоящее время для проведения исследований ядра используются различные методы лазерной оптической спектроскопии, среди которых можно выделить коллинеарно-спектроскопические методы [2] и методы, основанные на резонансной лазерной ионизации атомов [14, 15].

Суть методов резонансной ионизации заключается в последовательном возбуждении атома от уровня к уровню с помощью настроенных в резонанс лазеров с перестраиваемой длиной волны и последующей ионизацией, которая может осуществляться разными путями: или с помощью мощного нерезонансного излучения, или резонансным возбуждением автоионизационного состояния, или импульсом электрического поля, ионизирующим атом из высоковозбужденного (ридберговского) состояния. Схема возбуждения может состоять из двух или трех ступеней в зависимости от конфигурации атомных уровней и потенциала ионизации исследуемого элемента. При этом эффективность лазерной ионизации достигает десятков процентов, но главным преимуществом методов резонансной ионизации является их высокая селективность: частоты атомных переходов уникальны для каждого элемента, поэтому настроенные в резонанс с этими переходами лазеры ионизируют только атомы данного элемента.

Для ядерно-физических исследований метод резонансной фотоионизации в режиме *on-line* был впервые использован на установке ИРИС для исследования ИС и СТС оптических линий радиоактивных атомов европия [16]. При этом ионизация исследуемых атомов происходила на выходе из масс-сепаратора. Качественное развитие метода связано с внедрением лазерного ионного источника (ЛИИ) [17], представляющего собой соединенную с мишенным объемом горячую полость, в которую направляются лазерные лучи для осуществления резонансной ионизации исследуемого элемента. Предложенная конструкция ЛИИ позволила значительно увеличить время пребывания атомов в его объеме и, следовательно, существенно повысить вероятность селективной ионизации атомов исследуемого элемента при помощи импульсного лазерного излучения. В сочетании с масс-сепаратором, который отбирает изотопы заданной массы, ЛИИ позволяет получать практически изобарно-чистые источники ядер, что очень важно для дальнейших ядерных исследований любого рода.

ЛИИ, помимо использования в качестве «поставщика» экзотических ядер для самых различных экспериментов, также может успешно применяться и для измерения важнейших характеристик ядра. Применение лазерной резонансной фотоионизации непосредственно в полости ионного источника мишенного устройства составляет суть экспериментального метода резонансной фотоионизационной спектроскопии в лазерном ионном источнике (*in-source resonance-ionization spectroscopy technique*).

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД

В экспериментах по исследованию нейтронодефицитных изотопов Вi и Au использовался метод резонансной фотоионизационной спектроскопии в ЛИИ [18, 19]. Главным преимуществом данного метода, по сравнению с другими лазерными методами исследования ядер, является его высокая чувствительность, которая обеспечивает возможность исследования ядер, образующихся в мишени со скоростью до 0,1 шт./с [20, 21].

Эксперименты были выполнены на ISOL-установках ИРИС (для изотопов Вi) и ISOLDE (для изотопов Вi и Au). Радиоактивные изотопы Вi и Au образуются в урановой мишени, облучаемой пучком протонов с энергией 1 ГэВ (ПИЯФ) и 1,4 ГэВ (ISOLDE). Лазерные системы [22, 23] установок ИРИС и ISOLDE обеспечивали трехступенчатую резонансную фотоионизацию атомов Вi и Au. На первой ступени использовался узкополосный лазер (ширина линии 700 МГц), сканирующий оптическую частоту атомного перехода: 306,9 нм в Вi, 267,6 нм в Au. Экспериментальный спектр представляет собой зависимость фотоионного тока от частоты сканирующего лазера. Регистрация ионного тока производилась с помощью детектирования характеристического α -или γ -излучения. В ряде измерений использовался многоотражательный времяпролетный спектрометр (MR TOF MS) [24].

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика обработки экспериментальных оптических спектров с целью определения изменений среднеквадратичного зарядового радиуса (СКЗР — $\delta\langle r^2 \rangle$) подробно описана в [25]. Из анализа ИС и СТС оптических линий спектров висмута, измеренных на установках ИРИС и ISOLDE, были получены [12, 20, 28] $\delta\langle r^2 \rangle$, магнитные дипольные μ и электрические квадрупольные Q_S моменты изотопов Вi.

Анализ данных для множества изотопических цепочек, полученных за все время исследований ИС, показывает, что основной тренд изменений $\delta\langle r^2 \rangle$ хорошо описывается дроплет-моделью (droplet model, DM) [26]. Отклонения от ее предсказаний объясняются изменением среднеквадратичной квадрупольной деформации $\delta\langle \beta_{DM}^2 \rangle$:

$$\delta\langle r^2 \rangle = \delta\langle r^2 \rangle_{DM} + \frac{5}{4\pi} \langle r^2 \rangle_{DM} \delta\langle \beta_{DM}^2 \rangle, \quad (1)$$

где первое слагаемое отражает влияние изменения объема сферического ядра ($\langle r^2 \rangle_{DM}$ — СКЗР сферического ядра того же объема) на СКЗР, а второе — влияние изменения деформации.

На рис. 1 представлены $\delta\langle r^2 \rangle$ для изотопов Вi по отношению к стабильному $^{209}\text{Вi}$. Пунктирные линии на этом рисунке проведены в соответствии с дроплет-моделью при фиксированной среднеквадратичной деформации $\langle \beta^2 \rangle^{1/2}$. Они дают представление об изменении деформации

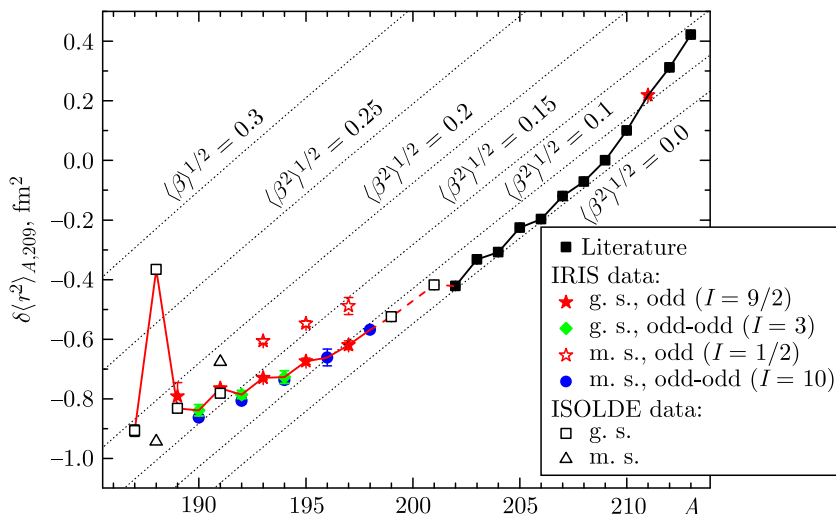


Рис. 1. Изотопическая зависимость изменений СКЗР ($\delta\langle r^2 \rangle$) для изотопов Bi. Квадраты — литературные данные [27]; данные ИРИС: темные звездочки — нечетные по A изотопы с $I = 9/2$ [12, 28]; светлые звездочки — нечетные по A изомеры с $I = 1/2$ (внедренные изомерные состояния) [28]; ромбы — нечетно-нечетные ядра с $I = 3$ [12]; кружки — нечетно-нечетные ядра с $I = 10$ [12]; данные ISOLDE: светлые квадраты — основные состояния [20]; светлые треугольники — изомерные состояния [20]

в изотопической цепочке Bi. В области $N = 104$ обнаружен резкий рост зарядового радиуса $^{188}\text{Bi}^g$ по сравнению с радиусами соседних изотопов $^{187, 189}\text{Bi}^g$. Также обнаружен очень большой изомерный сдвиг у $^{188}\text{Bi}^m$.

Оба эффекта возникают при том же числе нейтронов ($N = 105$), при котором у ядер ртути наблюдается чередование форм и аналогичный изомерный сдвиг [5] (см. рис. 3).

Метод лазерной спектроскопии позволяет одновременно измерять как статическую, так и динамическую деформацию, так как квадрупольный момент Q чувствителен только к статической деформации (см., например, формулу (4) в [28]), а $\delta\langle r^2 \rangle$ — к суперпозиции динамической и статической деформации (см. (1)). На рис. 2 представлено сравнение параметров деформации для изотопов Bi, полученных из Q и $\delta\langle r^2 \rangle$. Для $^{188}\text{Bi}^g$ значение параметра деформации, извлекаемого из Q ($\beta_Q = +0,25(7)$), хорошо согласуется со значением деформации, получаемым из данных по $\delta\langle r^2 \rangle$ ($\beta_{\text{DM}} = 0,28(2)$), что является дополнительным экспериментальным подтверждением сильной положительной деформации (prolate deformation) этого ядра.

Для внедренных изомерных состояний Bi со спином $I = 1/2$ ($A = 193, 195, 197$) наблюдается большой изомерный сдвиг (см. рис. 1). Этот ска-

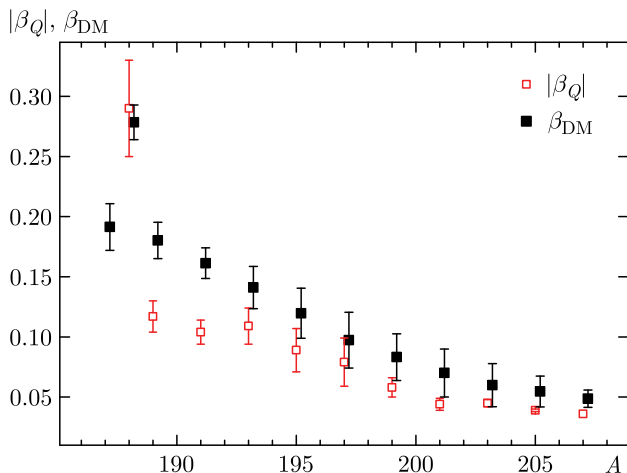


Рис. 2. Сравнение параметров квадрупольной деформации β_{DM} и β_Q для изотопов Bi. Темные квадраты — β_{DM} , полученный из изменений СКЗР ($\delta\langle r^2 \rangle$), в рамках дроплет-модели; светлые квадраты — модуль β_Q , полученный из квадрупольного электрического момента Q

чок в $\delta\langle r^2 \rangle$, подобный обнаруженному ранее скачку для внедренных изомерных состояний Tl со спином $I = 9/2$ ($A = 185, 191, 193, 195, 197$) [9], может быть интерпретирован как результат соответствующего скачка деформации. Примечательно, что величина этого скачка для Bi практически совпадает с величиной соответствующего скачка для изомеров Tl с тем же числом N . Это указывает на сходство форм внедренных изомеров Tl и Bi, хотя их конфигурация различна ($1p-2h$ в Tl и $2p-1h$ в Bi).

Из анализа ИС и СТС линий атомных спектров изотопов золота, измеренных на установке ISOLDE, были получены [29, 30] $\delta\langle r^2 \rangle$ по отношению к ядру стабильного ^{197}Au . Обнаружено (рис. 3), что ядра изотопов $^{180}, ^{181}, ^{182}\text{Au}$ ($N = 101, 102, 103$) сохраняют сильную деформацию, которая ранее была выявлена для ядер $^{183-186}\text{Au}$ [7], в то время как форма более легких ядер $^{176}, ^{177}, ^{179}\text{Au}$ ($N = 97, 98, 100$) вновь становится сферической, что характерно для изотопов золота с $A > 186$. Также обнаружено сосуществование форм (shape coexistence) для ядра ^{178}Au , которое имеет основное и изомерное состояния с различными деформациями.

На рис. 3 представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие различные типы эволюции формы ядер в области свинца вблизи середины нейтронной оболочки. Экспериментальные данные удовлетворительно описываются в расчетах по методу среднего поля [20, 30], в которых блокируемая орбиталь фиксировалась из условия описания

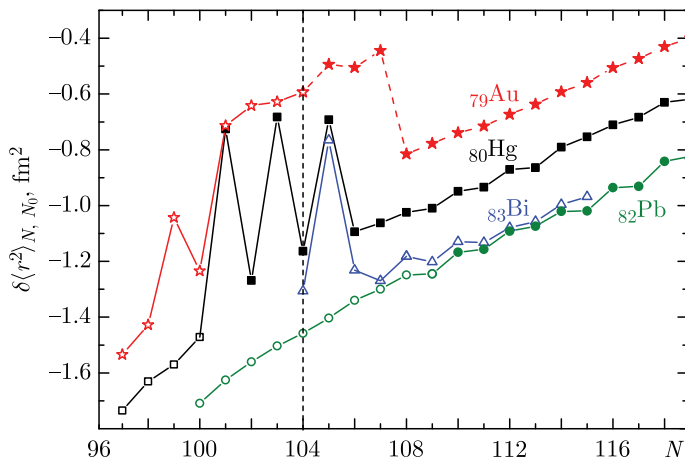


Рис. 3. Сравнение изменений СКЗР ($\delta\langle r^2 \rangle$) в области свинца вблизи $N = 104$. Круги — $\delta\langle r^2 \rangle$ изотопов свинца; треугольники — $\delta\langle r^2 \rangle$ изотопов висмута; квадраты — $\delta\langle r^2 \rangle$ изотопов ртути; звездочки — $\delta\langle r^2 \rangle$ изотопов золота. Светлые символы соответствуют $\delta\langle r^2 \rangle$, измеренным на установках ИРИС и ISOLDE [8, 11, 12, 20, 28–30]

экспериментальных данных по спинам, четностям и магнитным моментам рассматриваемых ядер.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕР НА УСТАНОВКЕ ИРИНА

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ на пучке тепловых нейтронов реактора ПИК реализуется проект ISOL-установки ИРИНА [31], создание которой позволит получить интенсивные изобарно-чистые пучки экзотических нейтроноизбыточных ядер. В качестве одного из основных направлений физических исследований на установке ИРИНА ведется изучение эволюции формы ядер в нейтроноизбыточной области методом резонансной фотоионизационной спектроскопии в лазерном ионном источнике. Характерные объекты для таких исследований на установке ИРИНА — это Sb, Sn, In, Cd, Ag с числом нейтронов, близким к магическому числу $N = 82$, и Ge, Ga, Zn, Cu и Ni в окрестности оболочки с магическим числом нейтронов $N = 50$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокая чувствительность метода резонансной фотоионизационной спектроскопии в ионном источнике позволяет получить модельно-независимую информацию о структуре ядра. Используя этот метод, на установках ИРИС и ISOLDE удалось провести лазерно-спектроскопические

исследования изотопов висмута и золота, недоступных для измерения другими лазерными методами.

Систематическое исследование эволюции зарядовых радиусов, деформации, одночастичных конфигураций и других характеристик основных и долгоживущих изомерных состояний ядер вблизи заполненной протонной оболочки ($Z = 82$) дает возможность построения двумерной картины (по N и по Z) изменения этих фундаментальных характеристик и выявления тем самым глобальных закономерностей этих изменений, которые должны описываться теорией ядра.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет гранта РФФИ № 19-02-00005.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Angeli I., Marinova K.* // At. Data Nucl. Data Tables. 2013. V. 99. P. 69.
2. *Campbell P., Moore I. D., Pearson M. R.* // Prog. Part. Nucl. Phys. 2016. V. 86. P. 127.
3. *Alkhazov G. D. et al.* // Z. Phys. A. 1990. V. 337. P. 367.
4. *Day Goodacre T. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 126. P. 032502.
5. *Bonn J. et al.* // Phys. Lett. B. 1972. V. 38. P. 308.
6. *Heyde K., Wood J. L.* // Rev. Mod. Phys. 2011. V. 83. P. 1467.
7. *Wallmeroth K. et al.* // Nucl. Phys. A. 1989. V. 493. P. 224.
8. *Seliverstov M. D. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2009. V. 41. P. 315.
9. *Barzakh A. E., Batist L. Kh., Fedorov D. V., Ivanov V. S., Molkanov P. L., Moroz F. V., Orlov S. Yu., Panteleev V. N., Volkov Yu. M.* // Phys. Rev. C. 2013. V. 88. P. 024315.
10. *Cocolios T. E. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 052503.
11. *Cubiss J. G. et al.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. P. 054327.
12. *Barzakh A. E., Fedorov D. V., Ivanov V. S., Molkanov P. L., Moroz F. V., Orlov S. Y., Panteleev V. N., Seliverstov M. D., Volkov Y. M.* // Phys. Rev. C. 2017. V. 95. P. 044324.
13. *Wood J. L., Zganjar E. F., De Coster C., Heyde K.* // Nucl. Phys. A. 1999. V. 651. P. 323.
14. *Амбарцумян Р. В., Калинин В. Н., Летохов В. С.* // Письма в ЖЭТФ. 1971. Т. 13. С. 305.
15. *Fedosseev V. N., Kudryavtsev Yu., Mishin V. I.* // Phys. Scripta. 2012. V. 85. P. 058104.
16. *Алхазов Г. Д. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 37. С. 231.
17. *Алхазов Г. Д., Берлович Э. Е., Пантелеев В. Н.* // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 14. С. 1109.
18. *Alkhazov G. D. et al.* // Nucl. Instr. Meth. B. 1992. V. 69. P. 517.
19. *Fedosseev V. N. et al.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2003. V. 204. P. 353.
20. *Barzakh A. E. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 127. P. 192501.
21. *Sels S. et al.* // Phys. Rev. C. 2019. V. 99. P. 044306.

22. Barzakh A. E. *et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 02B306.
23. Fedosseev V. *et al.* // J. Phys. G. 2017. V. 44. P. 084006.
24. Wolf R. N. *et al.* // Intern. J. Mass Spectrom. 2013. V. 349–350. P. 123.
25. Otten E. W. // Treatise on Heavy-Ion Science. New York, 1989. V. 8. P. 517.
26. Berdichevsky D., Tondeur F. // Z. Phys. A. 1985. V. 322. P. 141.
27. Pearson M. R. *et al.* // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2000. V. 26. P. 1829.
28. Barzakh A. E., Fedorov D. V., Ivanov V. S., Molkanov P. L., Moroz F. V., Orlov S. Y., Panteleev V. N., Seliverstov M. D., Volkov Y. M. // Phys. Rev. C. 2016. V. 94. P. 024334.
29. Barzakh A. E. *et al.* // Phys. Rev. C. 2020. V. 101. P. 064321.
30. Cubiss J. G. *et al.* // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131. P. 202501.
31. Panteleev V. N., Barzakh A. E., Fedorov D. V., Molkanov P. L., Seliverstov M. D. IRINA Project at the Reactor PIK // PNPI. High Energy Physics Division. Main Scientific Activities 2018–2022. 2023. P. 250–253.